

激光熔覆 Ni – WC 的农用刀具磨损行为与自磨刃形成机制研究

许令峰^{1,2} 邢延鹏¹ 宋月鹏^{1,2} 郭晶^{1,3} 宋占华^{1,4}
(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省设施园艺智慧生产技术装备重点实验室(筹), 泰安 271018; 3. 农业生产机械装备国家工程研究中心, 泰安 271018; 4. 农业装备智能化山东省工程研究中心, 泰安 271018)

摘要: 作物茎秆切割是机械化收获的关键环节, 刀具材料直接影响刀具寿命和作物切割质量。本文采用激光熔覆 Ni – WC 制备自磨刃刀具, 分析 WC 质量分数对熔覆层组织性能的影响。利用农机部件摩擦磨损试验机对刀具试样进行试验, 结合偏光显微镜与二值化图像处理技术, 定量分析了刃口磨损后的微观形貌, 获得刀具磨损量和刃口钝圆半径演化规律。熔覆层耐磨性和厚度是刀具耐磨性及刃口锋利保持的主要影响因素。试验结果表明, 当 WC 质量分数为 20% ~ 30%、熔覆涂层厚度为 0.6 ~ 0.8 mm 时, 刀具在工作过程中能够形成自磨刃, 并据此提出了自磨刃形成的判定标准和形成机制。研究结果为农用自磨刃刀具设计优化提供参考。

关键词: 农用刀具; 激光熔覆; 自磨刃; 刃口钝圆半径

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0239-08 OSID: 

Wear Behavior and Self-grinding Edge Formation Mechanism of Agricultural Tools Strengthened by Laser Cladding Ni – WC

Xu Lingfeng^{1,2} Xing Yanpeng¹ Song Yuepeng^{1,2} Guo Jing^{1,3} Song Zhanhua^{1,4}
(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Production Technology and Equipment for Facility Horticulture, Taian 271018, China
3. National Engineering Research Center of Agricultural Production Machinery and Equipment, Taian 271018, China
4. Shandong Engineering Research Center of Agricultural Equipment Intelligentization, Taian 271018, China)

Abstract: Crop stem cutting is a key step in mechanized harvesting, and the material design of the cutting tools directly affects their lifespan and the quality of crop cutting. The hardness and wear resistance of the integral cutting tools are low, and the tools is prone to chipping as the hardness increases. The self-sharpening edge technology can effectively solve this problem. The edge of cutting tool is composed of two or more materials, resulting in different wear resistance on two sides of the edge. During the operation a self-sharpening edge is formed, enabling the tool to remain sharp for a long time. However, systematic and quantitative analysis lacks on the mechanism of the self-sharpening edge formation. The reinforcement layer of Ni – WC was prepared on cutting tools by laser cladding to obtain self-sharpening. The microstructure, phase composition and hardness of the cladding layers were tested by using a metallographic microscope and X-ray diffraction. As the addition of WC the average hardness of the cladding layer increase, with the maximum reaching 979HV_{0.5}. The tool samples were tested by using a friction and wear testing machine of agricultural machinery components. Then combining polarized light microscopy with binary image processing technology, the micromorphology of the worn cutting edge was quantitatively analyzed in order to obtain the evolution law of tool wear amount and cutting edge blunt radius. The wear resistance and thickness of cladding layer were two main influencing factors for the wear resistance and sharp edge retention of tools. When the WC content was 20% ~ 30% and the cladding coating thickness was 0.6 ~ 0.8 mm, a self-sharpening edge can be formed. The field experiments were conducted to verify the results. Based on this, the criteria and formation mechanism for self-grinding edge were proposed. The research results can provide a reference for the design optimization of agricultural self-grinding edge cutting tools.

Key words: agricultural cutting tools; laser cladding; self-sharpening edge; cutting edge radius

0 引言

作物茎秆切割是牧草、粮食等作物机械化收获的必需环节,刀具作为直接与茎秆接触并承担切割任务的关键部件,其服役状态对收割效率和切割质量具有决定性影响^[1]。在使用过程中,刀具会发生磨损与刃口钝化,耐磨性能是影响使用寿命和切割质量的主要原因^[2-3]。农机刀具作业对象为农作物秸秆、牧草等,刀具受到植物硅酸体和粘附砂土的摩擦作用,刃口角及刃口钝圆半径逐渐增大,刃口失去合理几何外形,切割能力变差、能耗提高^[4-5]。

农机刀具以磨粒磨损为主,一般通过提高刀具硬度增加耐磨性^[6]。收获机刀片一般采用中、高碳钢(65Mn、T9 等)淬火或者低碳钢渗碳(20#钢等)等方式制备整体式刀具^[7-8],这类刀具材料硬度和耐磨性不高,且随着硬度提高,韧性降低,刀具易崩刃。自磨刃技术能够较好地解决这个问题,采用特殊工艺使刃口两刀面硬度不同,切割过程中产生不同磨损量而形成自磨刃特性,有利于提高刀具寿命、降低牧草切割损伤^[9]。在普通刀具底部制备一层耐磨材料,经过一段时间磨损后达到稳定的刃口截面形状,刃口可长时间保持锋利的几何外形。

欧美对自磨刃刀具制备的研究较早,高端农机制造公司(New Holland、LELY STORM、CLAAS 等)自磨刃技术已投入实际应用。O'dogherty^[10]对饲料粉碎机割刀的自磨刃特性进行了研究,结果表明,自磨刃割刀能够在磨损过程保持较好的刃口锋利度,从而提高割刀粉碎效率和使用寿命。近年来,随着刀具制备技术进步,国内农用刀具生产厂家也开始自磨刃刀具试制,利用激光熔覆制备自磨刃刀具,增强材料以 WC、TiC 等为主^[11-14],取得了较好的使用效果,但缺乏针对自磨刃形成机理的试验分析。

农用刀具切割过程,刃口钝化后,切割方式由“剪切”向“挤压和撕裂”转变,作物茎秆茬口被破坏^[15]。刃口钝圆半径变化显著且具有代表性,是刀具刃口几何形貌磨损改变的关键参数^[16-17]。依托自主设计的农机部件摩擦磨损试验台,本文开展刀具试样磨损试验,研究不同 WC 质量分数 Ni 基合金粉和熔覆层厚度条件下刀具磨损行为及刃口钝圆半径演化特征,分析自磨刃形成机制,利用熔覆刀具进行燕麦收获田间试验。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选用厚度为 10 mm 的 65Mn 钢板作为基材,材

料成分如表 1 所示。在激光熔覆前,利用抛光和清洁处理去除钢板表面氧化物和杂质,熔覆后对刀具试样进行开刃处理。

表 1 65Mn 化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of 65Mn %

元素	Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni
质量分数	97.84	0.67	0.27	1.12	0.03	0.02	0.02

熔覆材料选用 Ni-WC 复合粉末(粒度为 200 目)制备涂层,Ni 基合金粉成分如表 2 所示。

表 2 Ni60 化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical composition of Ni60 %

元素	Ni	C	Cr	Si	Fe	B
质量分数	69.4	0.4	15.0	4.0	8.0	3.2

1.2 试验设备

1.2.1 激光熔覆设备

试验设备为山东能源重装集团机械产品再制造国家工程研究中心的 3D 快速成型扫描再制造修复系统。采用同步送粉法对刀具进行激光熔覆,保护气体为惰性气体氩气,激光器的圆形光斑直径为 3.5 mm。熔覆前合金粉末在干燥箱内恒温 300℃干燥 1 h。

制备 17 把刀具试样,编号为 0~16。其中,0 号样品为未熔覆刀具,作为对照。1~16 样品为激光熔覆刀具,根据熔覆层材料组成与厚度参数分为 16 种参数组合,如表 3 所示。

表 3 试样编号对照

Tab.3 Sample number

编号	WC 质量 分数/%	熔覆层 厚度/mm	编号	WC 质量 分数/%	熔覆层 厚度/mm
1	0	0.4	9	20	0.4
2	0	0.6	10	20	0.6
3	0	0.8	11	20	0.8
4	0	1.0	12	20	1.0
5	10	0.4	13	30	0.4
6	10	0.6	14	30	0.6
7	10	0.8	15	30	0.8
8	10	1.0	16	30	1.0

1.2.2 组织性能检测方法

采用 DK7720 型电火花数控线切割机床沿垂直于激光扫描运动方向切割熔覆后试样,经镶样、研磨和抛光后,使用王水(36% 盐酸和 69% 浓硝酸按体积比 3:1 混合)进行腐蚀,时间 25~30 s,然后用无水乙醇冲洗试样并用电风吹干。采用北京时代 TMVP-1 型维氏硬度计测试熔覆层显微硬度,试验载荷为 4.9 N(HV_{0.5}),加载时间为 10 s,保载时间为

15 s。测试点从熔覆层表层到刀具基体内部,每 2 个临近测试点距离为 50 μm。

1.2.3 农机部件摩擦磨损试验机

试验装置如图 1 所示。试验过程,将磨料置于槽内,刀具试样固定安装于刀盘上,由旋转轴带动。刀具试样绕轴线做旋转运动,刀具刃口持续切割磨料,实现农用刀具切割磨损过程模拟。

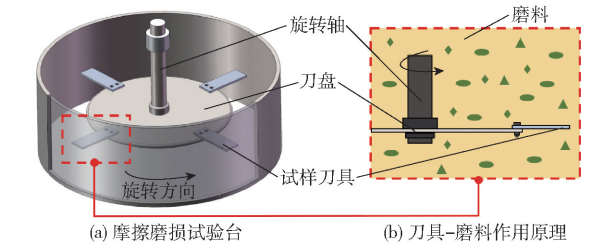


图 1 摩擦磨损试验台结构及刀具-磨料作用原理示意图
Fig. 1 Schematics of wear test bench and cutter - abrasive interaction

为模拟收获过程刀具与含砂植物茎秆复杂接触磨损环境,试验磨料采用燕麦茎秆与石英砂混合介质。其中,石英砂粒径为 0.3 ~ 0.5 mm,茎秆切割为长度 20 ~ 30 mm 的段状。2 种介质按体积比 5:1 (茎秆:石英砂)进行混合,并均匀加入磨料桶中,同时保持适度湿润,以获得稳定的磨损工况。

各刀具试样在相同试验条件下进行试验,试验过程每 1.5 h 更换 1 次混合磨料,并清洁、干燥、称量刀具试样,记录试样在不同磨损阶段的质量变化。

1.3 刀具刃口轮廓提取与圆拟合方法

采用线切割对磨损后刀具刃口进行取样,并用偏光显微镜观察刃口形貌,基于 Matlab R2020a 对刃口图像进行数字化处理与轮廓提取。刃口轮廓提取过程如图 2 所示,包括 4 个步骤:原始图像导入、灰度化处理、二值化分割,最后采用 Canny 边缘检测算法提取刃口轮廓,并以离散坐标点形式输出^[18-20]。

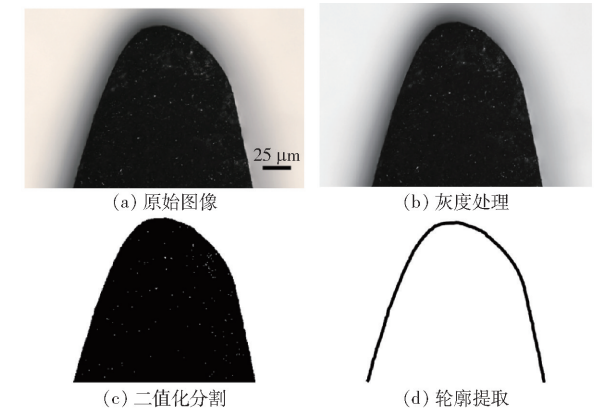


图 2 刃口轮廓曲线提取
Fig. 2 Contour extraction of cutting edge

为获得刃口钝圆半径,提取的刃口轮廓数据导入 Origin,对刃口尖端微弧区域进行圆拟合分析。

在刃口两侧近似线性的区域分别做切线,与刃口尖端微弧边缘轮廓曲线交点作为拟合起止点,两切点之间曲线定义为有效拟合线段,如图 3a 所示。采用“Analysis - Nonlinear Curve Fit”模块进行圆拟合,圆方程表达式为

$$y = y_0 + \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2} \tag{1}$$

式中 x_0 ——圆心横坐标
 y_0 ——圆心纵坐标 r ——圆弧半径

拟合结果如图 3b 所示,黑色散点为刃口轮廓数据,红色曲线为圆拟合结果,拟合圆与实际数据吻合良好, R^2 为 0.957 1。拟合得到的圆半径 r 即为刃口钝圆半径,用于评价刃口锋利程度。

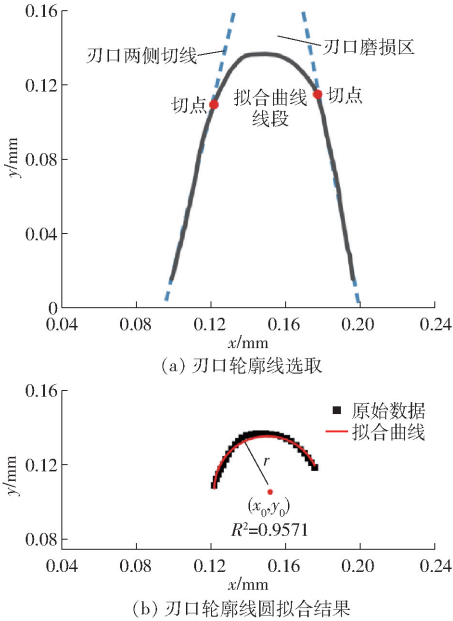


图 3 刃口轮廓圆拟合过程示意图
Fig. 3 Schematics of circular approximation of cutting edge contour

2 试验结果与分析

2.1 熔覆层组织

图 4 为不同 WC 质量分数熔覆层组织形貌,熔覆层组织为快速凝固的铸态组织,试验熔覆层组织致密,没有出现气孔、裂纹等缺陷。不同 WC 质量分数熔覆层组织没有显著差异,试样截面主要由熔覆层、基体和结合区域组成。熔覆层与基体结合处,熔融粉末快速凝固形成的平面晶,熔覆层与基体形成了冶金结合,有明显界面分开^[21-23]。熔覆层靠近基体区域,温度梯度大,凝固速度快,形成了沿热流方向定向生长的柱状组织。熔覆层中部区域,温度梯度减小,形成大量枝晶,受散热方向的影响,仍然具有方向性。熔覆层靠近表面温度梯度进一步减小,组织形貌主要为短轴枝晶和等轴晶^[24-25]。

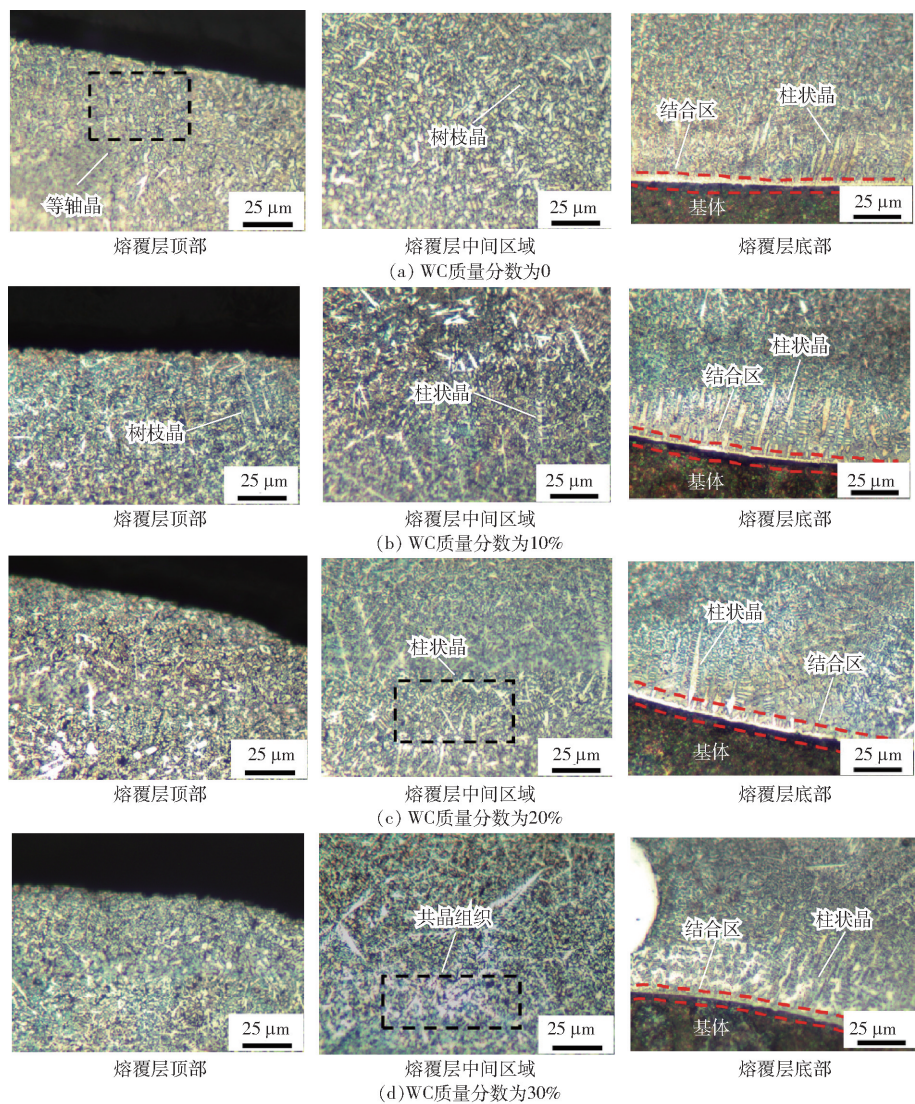


图 4 不同 WC 质量分数熔覆层的显微组织

Fig. 4 Optical microstructures of cladding layers with different WC contents

2.2 X 射线物相分析

不同 WC 质量分数熔覆层 XRD 衍射结果如图 5 所示。由图 5 可知,未添加 WC 熔覆层主要由 γ -(Fe,Ni) 固溶体和少量 Ni_3Fe 组成,加入 WC 后,熔覆层中出现 WC 、 W_2C 、 Cr_7C_3 和 Cr_{23}C_6 等碳化物衍射峰^[26-27]。熔覆过程在激光作用下,部分 WC 颗粒发生熔解与分解,W 和 C、Cr 等元素形成硬质相,与 WC 颗粒共同提高熔覆层材料硬度。

2.3 熔覆层显微硬度

图 6 为试样硬度分布情况。当 WC 质量分数为 10%、20% 和 30% 时,熔覆层平均显微硬度分别为 924HV_{0.5}、958HV_{0.5} 和 979HV_{0.5},是 65Mn 基体硬度的 2 倍以上,满足自磨刃刀具形成对硬度高低搭配的要求。熔覆层沿厚度方向波动幅度小,熔覆层和基体的结合区域在熔覆过程产生了元素扩散,硬度呈梯度分布,各试样均形成了连续的“熔覆层-结合区-基体”硬度分布特征。

添加 WC 提高了熔覆层硬度,在激光热作用下,WC 颗粒以未熔化或半熔融状态保留于熔覆层中,起到强化作用。也有部分 WC 发生分解,释放的 W、C 元素与熔池中 Fe、Cr 等合金元素反应,形成 Cr_{23}C_6 、 W_2C 等多种硬质碳化物相,提高了熔覆层硬度,同时对晶界起到钉扎作用,有助于抑制晶粒长大,从而产生一定的细晶强化效应^[28]。

2.4 刀具试验摩擦磨损结果

利用摩擦磨损试验机(图 1)对刀具试样进行模拟试验,累计磨损时间 21 h 的质量损失如图 7 所示。在磨料作用下 0 号刀具刀口失重率最大,经激光熔覆处理的试样磨损量显著降低。随着熔覆材料中 WC 质量分数提高及熔覆厚度增加,试样磨损量降低。

随着 WC 质量分数提高,刀具试样质量损失“先下降、后趋稳”。当 WC 质量分数为 20% ~ 30% 时,磨损质量降低趋于平缓。熔覆层厚度增加有利

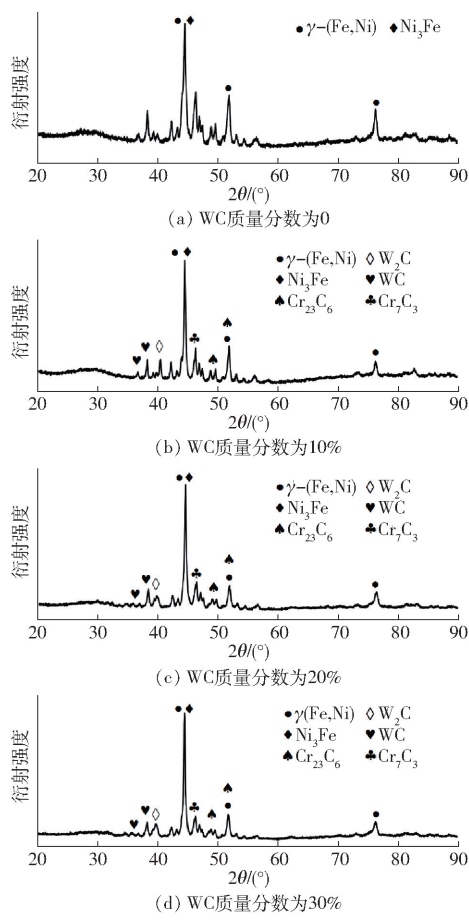


图 5 不同 WC 质量分数熔覆层 X 射线衍射图谱
Fig.5 XRD patterns of cladding layers with different WC contents

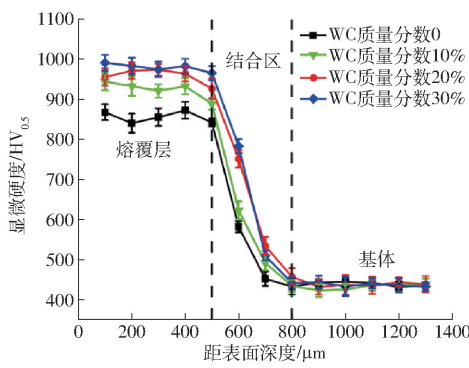


图 6 不同 WC 质量分数熔覆层硬度分布
Fig.6 Hardness distribution of cladding layers with different WC contents

于提高在切割过程的承载能力,减缓应力向基体传递,提高了试样耐磨性。但当厚度为 0.8 ~ 1.0 mm 时,对试样耐磨性的影响也呈边际效应,磨损质量保持稳定,部分试样甚至出现小幅波动现象。当 WC 质量分数提至 20% ~ 30%、熔覆层厚度达 0.6 ~ 1.0 mm 时,刀具磨损量处于较低水平,耐磨性能稳定。

2.5 刀具钝圆半径与熔覆层硬度和厚度之间的关系

随着磨损进行,刃口轮廓由初始的尖锐形态逐步向圆钝化演化,钝圆半径不断增大;而当熔覆层与

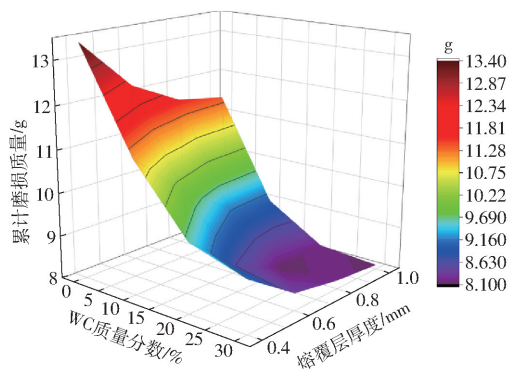


图 7 刀具试样磨损失质量分布
Fig.7 Distribution of sample's wear loss

基体在硬度、耐磨性等方面存在合理梯度匹配时,刃口区域在磨损过程可能因材料选择性脱落或相界协同作用而表现出一定的自锐化倾向,从而在稳定磨损阶段维持较小的钝圆半径。因此,磨损后刃口钝圆半径及其分布特征,可作为评价刀具是否形成自磨刃的重要定量依据之一。

选取 0 号、1 号、10 号和 16 号 4 组典型试样,钝圆半径拟合结果如图 8 所示。试样拟合曲线与原始刃口曲线整体吻合良好, R^2 在 0.97 以上。

试验刀具刃口钝圆半径与熔覆层厚度和 WC 质量分数曲面关系如图 9 所示。随着熔覆层 WC 质量分数提高,试样钝圆半径降低。当 WC 质量分数较低(0 ~ 10%)时试样钝圆半径相对较大,刃口钝化程度明显;当 WC 质量分数提至 20% ~ 30% 时,钝圆半径变化趋于平缓,熔覆层耐磨性稳定,刀具在试验过程维持较稳定的刃口几何形貌。

熔覆层厚度对钝圆半径的影响较为复杂,当熔覆层厚度由 0.4 mm 增加至 0.6 mm 时,钝圆半径明显减小;当厚度进一步增加至 0.8 ~ 1.0 mm 时,钝圆半径开始小幅增大,熔覆层厚度增加,刀具耐磨性能较好,但不利于形成锋利的刃口。

2.6 自磨刃形成判定依据

为实现自磨刃形成程度的定量判定,对 16 组激光熔覆刀具试样刃口钝圆半径进行由大到小的排序分析,结果如图 10 所示。

各试样钝圆半径整体呈分段分布特征,其中在试样 15 号与试样 12 号之间出现本组数据中最大相邻差值。采用最大间隙法,以该最大相邻差值作为判别依据,取间隙中点对应的钝圆半径 $r \approx 0.023$ mm 作为自磨刃形成的临界阈值。当磨损后刃口钝圆半径 r 小于等于 0.023 mm 时,认为刃口能够在磨损过程能维持较小的钝化程度,判定为“形成自磨刃”;当 r 大于 0.023 mm 时,则判定为“未形成自磨刃”。Rostek 等^[29]熔覆制备了饲草料收获机械刀具,采用刃口钝圆半径 R_e 评价刀具锋利度及磨损程度。确

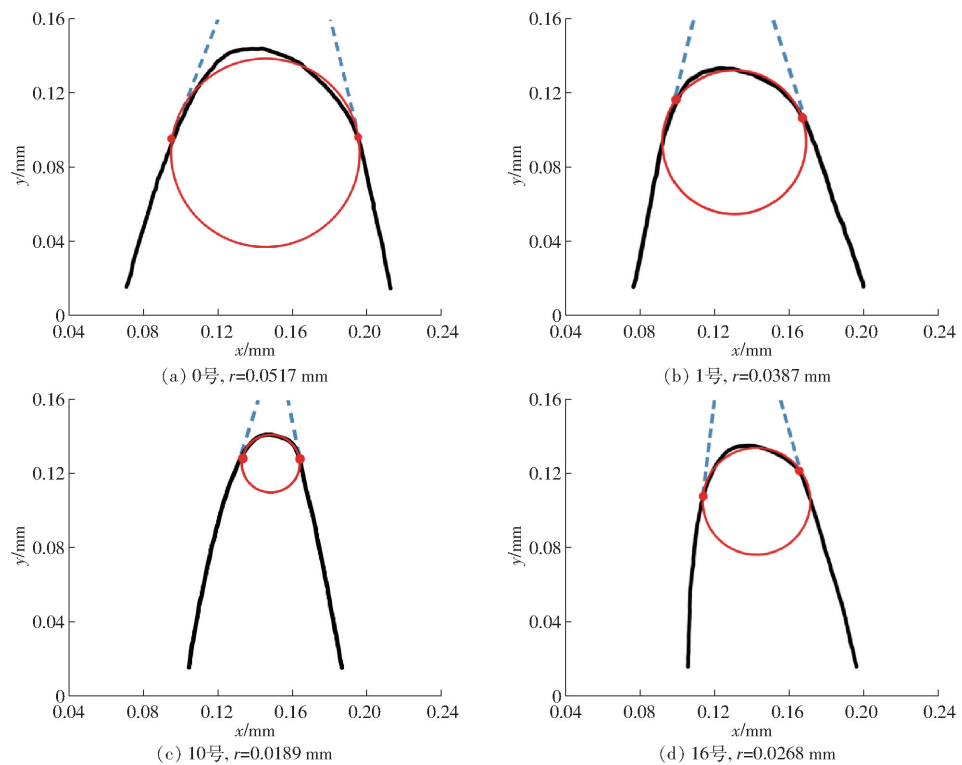


图 8 部分试样刃口轮廓线圆拟合结果

Fig. 8 Some circular fitting result of edge contour line

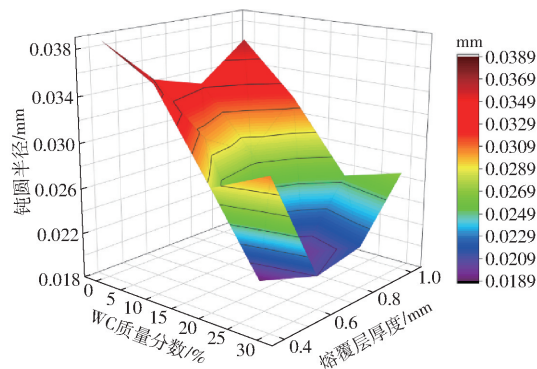


图 9 刀具试样刃口钝圆半径分布

Fig. 9 Distribution of sample's cutting edge radius

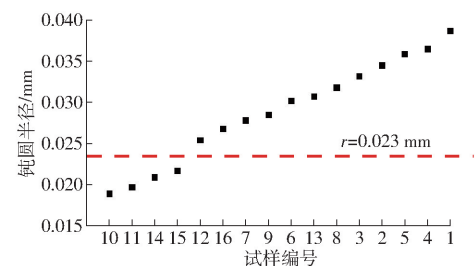


图 10 试样钝圆半径散点分布图

Fig. 10 Scatter plot of sample's rounded radius

定锋利状态下 R_E 约为 0.02 mm, 磨损后可增至 0.2 mm, 与本文所得 R_E 临界值数量级一致。因此, 采用刃口钝圆半径能够作为自磨刃形成的判定依据。

自磨刃形成实质上是基体与熔覆层在耐磨性差异作用下产生的差异化磨损结果, 熔覆层耐磨性高

于基体, 使基体侧在磨损过程优先退让, 推动刃口几何形态向熔覆层一侧调整, 熔覆层承担主要载荷, 抑制刃口进一步钝化。在长期磨损条件下, 基体与熔覆层之间形成相对稳定的磨损平衡, 使刃口曲率半径维持在较小范围内, 表现出稳定的自磨刃特征。

2.7 田间试验

在内蒙古锡林郭勒草原, 利用试制的自磨刃刀具进行了燕麦田间收获作业试验。选取前期磨损试验所得最优参数区间内 WC 质量分数 20%、熔覆层厚度 0.6 mm 的激光熔覆刀具为代表, 与未进行激光熔覆处理的普通刀具进行对比。在相同切割作用条件下, 随着切割时间延长, 普通刀具刃口易磨钝 (图 11a、11c), 激光熔覆刀具刃口磨损程度较低, 能够在作业过程保持较小的钝圆半径并形成稳定自磨刃 (图 11b、11d)。

连续作业 76 h 后, 对刀具试验前后质量进行分析, 结果如图 12 所示。在相同作业条件下, 自磨刃刀具质量损失比普通刀具减小 13.5 g。激光熔覆处理提高了刀具耐磨性, 延长了稳定切割作业时间, 作业后割茬整齐一致。

3 结论

(1) 自磨刃的形成本质上是刃口材料耐磨性不同导致的差异化磨损, 基体侧优先磨损退让, 耐磨的熔覆层暴露并承担主要载荷, 二者共同驱动刃口几

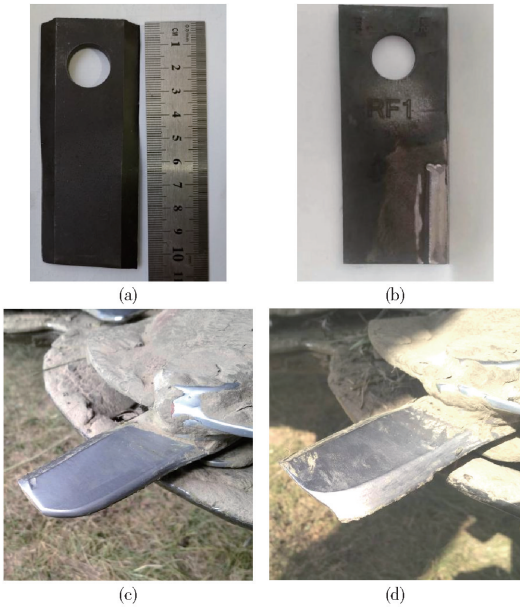


图 11 茎秆切割收获 43 h 后刀具形貌
Fig. 11 Morphology of cutter after 43 h of oat cutting

何形貌向稳定、小钝圆半径状态自调节演化。

(2)激光熔覆 Ni - WC 强化层能够显著改善刀

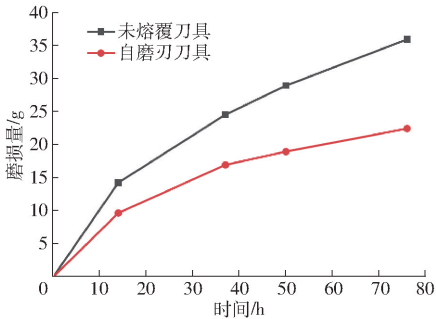


图 12 试验刀具磨损量对比
Fig. 12 Comparison of wear mass loss of test cutters

具的磨损行为,刃口钝圆半径增长得到有效抑制,激光熔覆处理可有效提升刀具耐磨性与刃口几何保持能力。当 WC 质量分数为 20% ~ 30%、熔覆层厚度为 0.6 ~ 0.8 mm 时有利于自磨刃形成与稳定维持。

(3)对刀具磨损试样的刃口钝圆半径进行了拟合统计分析,提出了自磨刃定量判定方法,当磨损后刃口钝圆半径小于约 0.023 mm 时,刀具在磨损过程可维持相对稳定且锋利的刃口形态,表现出明显的自磨刃特征。

参 考 文 献

[1] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(8): 1-25.
Wang Decheng, He Changbin, Wu Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1-25. (in Chinese)

[2] Xu L, Li M, Song Z, et al. WC-high entropy alloy reinforced long life self-grinding silage knife prepared by laser cladding[J]. Nanomaterials, 2022, 12(6): 1013.

[3] 郑嘉鑫,王世顺,马龙,等. 三七茎叶采收机仿生切割刀片设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):117-126.
Zheng Jiaxin, Wang Shishun, Ma Long, et al. Design and experiment of bionic blades for *Panax notoginseng* stem and leaf harvesting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 117-126. (in Chinese)

[4] Wu K, Bai C, Ren L, et al. Study on low-damage cutting of alfalfa stalks by self-sharpening blades of gradient material with carbon-nitron-boronized heat-treatment[J]. Coatings, 2022, 12(9): 1319.

[5] 尤泳,胡鹏展,王德成,等. 青饲料收获技术与装备研究综述[J]. 农业机械学报,2025,56(11):21-41.
You Yong, Hu Pengzhan, Wang Decheng, et al. Review of research on green forage harvesting technologies and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 21-41. (in Chinese)

[6] 王伟,宋月鹏,许令峰,等. 真空复合轧制硬度梯度材料的显微组织及硬度分布[J]. 材料热处理学报,2018,39(9): 87-92.
Wang Wei, Song Yuepeng, Xu Lingfeng, et al. Microstructure and hardness distribution of hardness gradient materials via vacuum composite rolling process[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(9): 87-92. (in Chinese)

[7] GB/T 1209.3—2009 农业机械切割器第3部分:动刀片、定刀片和刀杆[S].

[8] GB/T 19841—2005 旋转割草机刀片技术要求[S].

[9] 黄建洪. 农机零件的磨损、选材及热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

[10] O'dogherty M J. A review of research on forage chopping[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(4): 267-289.

[11] 任津毅,牟建伟,于传军,等. AF1410 钢表面激光熔覆 WC 增强 Ni 基复合涂层的组织与性能[J]. 金属热处理,2025, 50(6): 261-269.
Ren Jinyi, Mu Jianwei, Yu Chuanjun, et al. Microstructure and properties of WC reinforced Ni-based composite coatings on AF1410 steel surface by laser cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(6): 261-269. (in Chinese)

[12] 陆海峰,潘晨阳,覃恩伟,等. 45 钢表面激光熔覆 WC/Ni 基合金复合覆层的组织和性能[J]. 金属热处理,2019, 44(12):19-25.
Lu Haifeng, Pan Chenyang, Qin Enwei, et al. Microstructure and properties of laser clad WC/Ni-based alloy composite

coating on 45 steel surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(12): 19–25. (in Chinese)

[13] 张磊, 魏鑫, 霍嘉翔, 等. TiC 含量对激光熔覆 AlCoCrFeNi 基高熵合金复合涂层抗磨损和耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(5): 76–83.

Zhang Lei, Wei Xin, Huo Jiaxiang, et al. Influence of TiC content on wear corrosion resistance resistance of AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2024, 52(5): 76–83. (in Chinese)

[14] 张宏亮, 王明欣, 张京兵, 等. TiC 含量对 AlCoCrFeNi 高熵合金熔覆层组织与耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(9): 275–279.

Zhang Hongliang, Wang Mingxin, Zhang Jingbing, et al. Effect of TiC content on microstructure and wear resistance of AlCoCrFeNi high-entropy alloy clad layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(9): 275–279. (in Chinese)

[15] Jankauskas V, Abrutis R, Zunda A, et al. Wear study of straw chopper knives in combine harvesters[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7384.

[16] 杨勇, 赵雪峰, 秦浩, 等. 涂层与钝化非对称刃口几何对刀具磨损的影响[J]. 机械设计与制造, 2025(2): 135–143.

Yang Yong, Zhao Xuefeng, Qin Hao, et al. Effect of coating and passivation asymmetric edge geometry on tool wear[J]. Machinery Design Manufacture, 2025(2): 135–143. (in Chinese)

[17] Selvakumar J, Sakthivel S, Praveen J A, et al. Effect of edge radius on forces, tool wear and surface integrity under edge radius dominated tool-chip contact conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2024, 238(1–2): 302–314.

[18] 敖日格乐, 张文杰, 王帅, 等. 葵花籽物理接触参数测定与离散元仿真标定[J]. 农机化研究, 2023, 45(4): 139–147.

Ao Rigele, Zhang Wenjie, Wang Shuai, et al. Measurement of physical contact parameters and discrete element simulation calibration of sunflower seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(4): 139–147. (in Chinese)

[19] Du C, Han D, Song Z, et al. Calibration of contact parameters for complex shaped fruits based on discrete element method: the case of pod pepper[J]. Biosystems Engineering, 2023, 226: 43–54.

[20] Ding X, Wang B, He Z, et al. Fast and precise DEM parameter calibration for *Cucurbita ficifolia* seeds[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 258–276.

[21] 赵建国, 李建昌, 王安, 等. 喷焊余温淬火改善深松铲尖铁基涂层耐磨性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 65–71.

Zhao Jianguo, Li Jianchang, Wang An, et al. Improvement of wear resistance of iron-based coatings on subsoiler tips by thermal spraying residual temperature quenching[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 65–71. (in Chinese)

[22] Feng M, Ma Y, Tian Y, et al. Microstructure and wear resistance of Ti6Al4V titanium alloy laser-clad Ni60/WC composite coating[J]. Materials, 2024, 17(1): 264.

[23] Zhou M, Cui W, Chen Z, et al. Mechanism and performance characterization of heat treatment on laser-cladded Ni–WC coatings[J]. Coatings, 2024, 14(12): 1557.

[24] Cai Z, Feng M, Zhang W, et al. Molten pool flow and microstructure evolution in laser cladding of SiC/Mo-based coating[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 252: 127482.

[25] Wang T, An Y, Sun P, et al. Impact of different nanosized–WC contents on the microstructure and wear resistance of direct energy deposition Inconel 625/WC composites by circular beam oscillating laser[J]. Ceramics International, 2025, 51(12): 15557–15570.

[26] Ma C, Li H, Xia F, et al. Preparation and characterization of Ni60–WC composites fabricated using laser cladding technique [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(6): 4624–4632.

[27] Shen X, Peng H, Xue Y, et al. Microstructure and properties of WC/Ni-based laser-clad coatings with different WC content values[J]. Materials, 2022, 15(18): 6309.

[28] Zhao S, Jia C, Yuan Y, et al. Effects of laser remelting on microstructural characteristics of Ni–WC composite coatings produced by laser hot wire cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 908: 164612.

[29] Rostek T, Homberg W. Locally graded steel materials for self-sharpening cutting blades[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 2185–2190.